

補助事業番号 2020M-193

補助事業名 2020年度 カーボンモノリスを利用した高性能断熱材料の開発 補助事業

補助事業者名 東京理科大学 先進工学部マテリアル創成工学科 教授 向後 保雄

1 研究の概要

本研究では、「微細構造制御」、「モデリング・解析」及び「アブレータ開発」の3つの項目を挙げて研究を遂行した。

<微細構造制御>

レゾール型フェノール樹脂、硬化剤及びエチレングリコールからなる混合溶液のスピノーダル分解により得られた多孔質フェノールを炭化することで、気孔径が $0.8\sim 3\mu\text{m}$ 程度まで制御可能な多孔質炭素(カーボンモノリス)の作製プロセスを確立した。

<モデリング・解析>

X線CT等で構造を取得した多孔質炭素の3次元モデルを作製し、力学特性(ヤング率)の解析を行った。従来の理論では説明できなかった構造と力学特性の関係が明らかとなり、炭素に限らず多孔質材料全般の力学特性評価手法を確立した。

<アブレータ開発>

大気圏再突入時の熱防御材として用いられるアブレータは基材と樹脂からなる材料である。多孔質炭素を基材としてアクリル樹脂を含浸して作製するプロセスを確立した。また、作製したアブレータは大気圏再突入環境を模擬できるアーク風洞試験を行うことで性能を評価した。試験時の表面及び内部の温度変化を解析的に明らかにする手法を確立した。

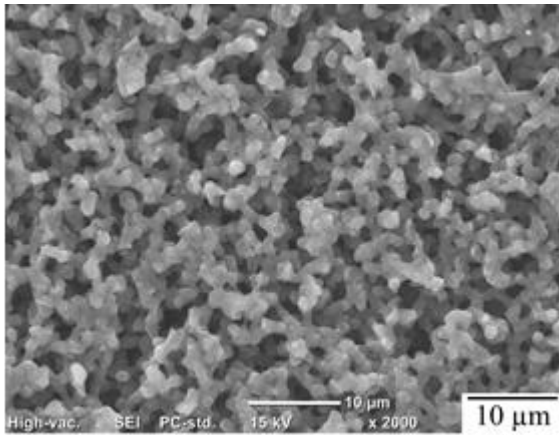
2 研究の目的と背景

宇宙から大気圏に再突入する宇宙機先端は大気が断熱圧縮され表面温度は材料の耐熱限界を越え、最大 10000°C に達する。機体保護のための熱防御材料が開発され、短い炭素繊維をフェノール樹脂で固定した材料が「アブレータ」として使用されている。アブレータの候補材料として多孔質炭素が検討されてきたが、多孔質材料の構造制御及び設計指針が未確立であるため、軽量($0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以下)、樹脂含浸可能、動圧に耐えうる力学特性を満足する材料は開発されていない。

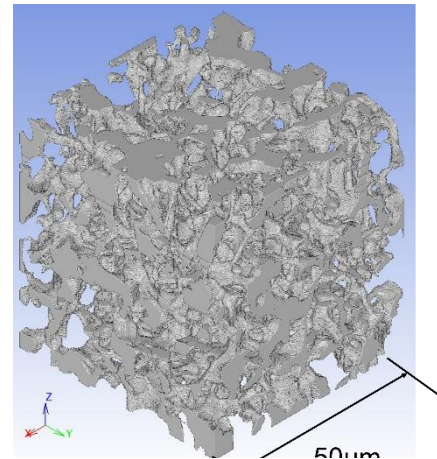
複数種の樹脂原料を混合した際に発生するスピノーダル分解を利用した多孔質材料の作製技術を確立し、気孔径や気孔率の制御が可能な多孔質材料を実現する。これをモデリング及び解析を組み合わせることで、材料種が異なっても多孔質材料の構造を力学特性や熱的特性の観点から設計し、求められる性能を発揮できることを目指す。その1つの実証として熱的特性及び力学特性の双方を要求される熱防御材料のアブレータを作製し、性能評価を行うことで、本研究で提案する設計指針が有効であることを実証する。

3 研究内容

(1) 多孔質材料のモデリング及び構造評価(<https://www.kogolab.com/jka-reports>)



カーボンモノリスの代表的な組織
ストラット(柱)がジョイント(結合部)を
介して三次元的なネットワークを形成

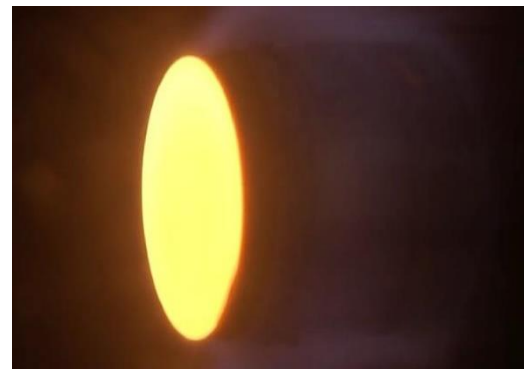


3次元モデル化した多孔質炭素
顕微鏡では困難な3次元的な構造を
反映したモデルを作製

(2) アーク風洞試験による性能評価(<https://www.kogolab.com/jka-reports>)



アーク風洞試験サンプル
高速気流により表面だけを加熱す
るため、側面は断熱している



アーク風洞試験中のサンプル
大気圏再突入を模擬した試験で
サンプル表面を2000~3000°Cに加熱

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

近年は民間企業の宇宙分野への進出が盛んであり、宇宙産業は現在加速度的にその市場規模を拡大している。もはや宇宙産業は「夢のある仕事」や「ロマン溢れる活動」ではなくなりつつある。その中で、大気圏再突入は一度大気圏外へ出た宇宙往還機にとっては避けては通れないものであり、熱防御材としてのアブレータの需要は今後拡大していくと思われる。熱防御材として国産かつ軽量・高性能なものを生み出すことは急務であり、多孔質炭素を基材とするアブレータの

応用が期待できる。作製プロセスから評価・解析まで包括的な研究を実施することができたので、今後アブレータを作製する際の設計指針として本研究を応用できるものと期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで炭素繊維強化プラスチック(CFRP)や炭素繊維強化炭素(C/C), セラミックス基複合材料といった宇宙用構造材料や耐熱材料の力学特性評価や力学的信頼性の評価を行ってきた。近年はその中でも多孔質炭素材料の力学特性評価及び多孔質炭素を基材としたアブレータの実現に取り組み始めていた。多孔質炭素材料の中には相対密度が同様の他の多孔質材料と比較すると力学特性(ヤング率や強度)が高いものがあることがわかっていたが、従来の理論では説明できない構造と力学特性の関係であった。

本研究では、多孔質炭素の構造を反映した3次元モデルの作製が可能となったことで構造と力学特性の評価が可能となった。これは従来の理論にあてはめて材料特性を評価する研究から一つステップアップした研究であり、解析と実験を組み合わせた本研究の手法で初めて実現したと言える。アブレータに関しても同様に実験と解析の両面から現象を明らかにすることができた。これまで実験のみで評価しなくてはならなかった問題に対して解析的な手法を多く用いたことでテーマを担当した学生にも実験と解析の双方の教育を行うことができた。この度の助成は2年間であったためこのような長期的で包括的な研究を遂行でき、査読つき国際雑誌にも2報論文を投稿できた。研究の集大成として実施することができ、非常に充実した2年間であった。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

査読付き国際雑誌 2報

- 1) Arai, Y., Daigo, Y., Kojo, E., Inoue, R., & **Kogo, Y.** (2021). Relationship between the microstructures and Young's modulus of three-dimensional networked porous carbon material. *Journal of Materials Science*, 56, 10338–10352. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05950-x>
- 2) Arai, Y., Daigo, Y., Kojo, E., Inoue, R., & **Kogo, Y.** (2021). Geometric factors affecting Young's modulus of porous carbon with a three-dimensional network structure. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 19(1), 523–532. <https://doi.org/10.1111/ijac.13930>

学会発表 3件

- 1) Yutaro Arai, Ryo Inoue, **Yasuo Kogo**, Analysis and evaluation on the relationship between structures and mechanical properties for a porous carbon material using image-based modeling, 14th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (PACRIM 14) (2021) (オンライン開催) (国際学会, 口頭, 招待講演)
- 2) 新井 優太郎, 横尾 和也, 小池 正太, **向後 保雄**, 熱可塑性樹脂含浸型多孔質炭素アブレータの損耗評価及び解析, 日本機械学会 2020 年度年次大会 (2020) (オンライン開催, 口頭)
- 3) 神 嘉希, 新井 優太郎, **向後 保雄**, カーボンモノリスの力学特性評価とイメージベースモデリング, 日本機械学会 2020 年度年次大会 (2020) (オンライン開催, 口頭)

7 補助事業に係る成果物

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京理科大学先進工学部マテリアル創成工学科
(センシンコウガクブマテリアルソウセイコウガッカ)

住 所: 〒125-8585
東京都葛飾区新宿6-3-1

担 当 者: 教授 向後 保雄(コウゴ ヤスオ)

担 当 部 署: 向後研究室(コウゴケンキュウシツ)

E - m a i l: kogo@rs.tus.ac.jp

U R L: <https://www.kogolab.com>